

# ПУТИ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТРОПОЛИТЕНА

Жемеров Г.Г., Холод О.И.

Национальный Технический Университет

«Харьковский Политехнический Институт»

Кафедра «Промышленная и биомедицинская электроника»,

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе 21, НТУ «ХПИ»,

Тел./факс: (057) 707-63-12, E-mail: zhemerov@gmail.com

**Annotation** – Characteristics of traction substation based on diode rectifier, active rectifier and power active filter are considered in this article.

**Key words** – Active rectifier, power active filter, traction substation, electrical power system, subway.

## ВВЕДЕНИЕ

Метрополитен (МП) обеспечивает большое количество городских транспортных перевозок (в г. Харькове около 55%) при сравнительно малой затрате времени и высокой безопасности движения [1]. В настоящее время в метрополитенах Украины перевозка пассажиров обеспечивается, в основном, вагонами с коллекторными двигателями постоянного тока последовательного возбуждения, питание которых осуществляется от контактной сети с номинальным напряжением 825 V. В свою очередь контактные сети запитаны от наземных или подземных тяговых подстанций, которые подключаются к сети 6 (10) kV через трехфазный понижающий трансформатор и диодный шестипульсный мостовой выпрямитель. Затраты электроэнергии на питание поездов в таких системах составляют до 80-95 % от общих затрат электроэнергии в МП и являются существенной составляющей себестоимости пассажирских перевозок (около 30 %) [1], [2]. Значительную часть затрат электроэнергии составляют потери на тяговых подстанциях, в контактной сети, тяговых электроприводах и их тормозных резисторах. Кроме того тяговые подстанции генерируют высшие гармоники тока в сеть 6 (10) kV, вызывая дополнительные потери энергии и искажения напряжения [3]. Вагоны с тяговыми коллекторными двигателями постоянного тока являются трудоемкими при техническом обслуживании и ремонте. В то же время наблюдается тенденция постоянного подорожания электроэнергии. Выше пере-

численные факторы стимулируют поиск новых эффективных технических решений, которые позволят снизить потери энергии при эксплуатации метрополитенов.

В последние десятилетия разработаны и освоены в промышленности новые типы полупроводниковых преобразователей – активные выпрямители (АВ), силовые активные фильтры (САФ) и многоуровневые инверторы (МИ) [3], [4], [5]. Их использование в системе электроснабжения (СЭ) контактной сети и подвижного состава МП может существенно улучшить уровень электромагнитной совместимости таких систем с питающей сетью и уменьшить потери электроэнергии.

В настоящей работе рассмотрены и сопоставлены характеристики типовой тяговой подстанции, эксплуатируемой на сегодняшний день в Украине, и перспективных подстанций, на которых используется АВ или САФ.

## ТРАДИЦИОННАЯ ТЯГОВАЯ ПОДСТАНЦИЯ

В МП Украины функционируют тяговые подстанции (ТП), понизительные подстанции (ПП) и совмещенные тяговые подстанции (СТП). Первые украинские линии МП обслуживают ТП и соответствующие каждой станции ПП собственных нужд – освещения, сигнализации, вентиляции и эскалаторов [1].

На ТП размещаются несколько трехфазных трансформаторов, которые подключаются к диодным выпрямительным мостам. В работе одновременно находятся два блока «трансформатор–выпрямитель».

Для обеспечения надежности каждый участок контактной сети питается от двух параллельно включенных ТП. Линии, введенные в эксплуатацию позднее, обслуживают СТП, в которых ТП совмещены сПП.

На Рис. 1 представлена эквивалентная схема традиционной СЭ контактной сети МП.

Сеть 6 (10) kV представлена трехфазной симметричной системой синусоидальных напряжений  $u_{SA}, u_{SB}, u_{SC}$ . Параметры сети учтены в каждой фазе активным сопротивлением  $R_S$  и индуктивностью  $L_S$ . Параметры линии, которая соединяет тяговую подстанцию 6 (10)/0.67 kV с подстанцией более высокого напряжения, учтены активным сопротивлением  $R_L$  и индуктивностью  $L_L$ . Первичная обмотка подключается к сети 6 (10) kV, а вторичная к шестипульсному мостовому диодному выпрямителю VD1 – VD6 (VD7 – VD12). Эквивалентная нагрузка представлена активным сопротивлением  $R_{Load}$ . В точке PCC (*Point of common coupling*) осуществляется определение коэффициента несинусоидальности напряжения сети.

На Рис. 2 приведена MatLab-модель традиционной СЭ контактной сети МП.

Модель состоит из тринадцати блоков, которые могут быть разбиты на следующие группы:

- Силовая схема – блоки 1, 3, 5, 6, 9 – 11;
- Датчики тока и напряжения – блоки 2, 4, 7, 8;
- Многолучевые осциллографы – блок 13;
- Вспомогательный блок – 12.

Назначение блоков силовой схемы:

1 – блок промышленной сети, моделирующий трехфазную систему синусоидальных напряжений с возможностью задания действующего значения линейного напряжения сети, активного и индуктивного сопротивлений сети;

3 – блок кабелей, соединяющих тяговую подстанцию с подстанцией более высокого напряжения;

5, 6 – блоки понижающих трансформаторов, первичная обмотка которых соединена в звезду, а вторичная – в треугольник;

9, 10 – блоки шестипульсных мостовых неуправляемых выпрямителей;

11 – блок эквивалентной резистивной нагрузки.

Датчики токов и напряжений осуществляют измерение фазных токов и напряжений питающей сети (блок 2), фазные токи и напряжение на входе понижающих трансформаторов (блок 4), фазные токи и напряжения на входах неуправляемых выпрямителей (блоки 7, 8) и ток и напряжение нагрузки. Все эти данные выводятся на многолучевые осциллографы (блок 13).

В блоке 12 выполняется расчет коэффициентов несинусоидальности напряжения и тока сети, угол сдвига фазного тока сети относительно фазного напряжения сети и коэффициент полезного действия СЭ контактной сети.

КПД определяем следующим образом: с помощью датчиков тока и напряжения фиксируются мгновенные значения фазных токов и напряжений сети  $u_S, i_S$  и мгновенные значения тока и напряжения нагрузки  $u_L, i_L$ . Сигналы датчиков поступают в блок 12, где вычисляются средние за период повторяемости,  $T=0,02$  s – активные мощности сети и нагрузки, по выражениям:

$$P_S = \frac{1}{T} \int_0^T (u_{SA} \cdot i_{SA} + u_{SB} \cdot i_{SB} + u_{SC} \cdot i_{SC}) dt, \quad (1)$$

$$P_L = \frac{1}{T} \int_0^T (u_L \cdot i_L) dt. \quad (2)$$

КПД СЭ равен:

$$\eta = \frac{P_L}{P_S}. \quad (3)$$

На Рис. 3 представлены кривые токов и напряжений сети и нагрузки в установившемся режиме. Номинальная мощность нагрузки 2,64 MW. Мощность короткого замыкания сети 53,3 MVA.

В Таблице 1 представлены показатели MatLab-модели традиционной СЭ контактной сети МП.

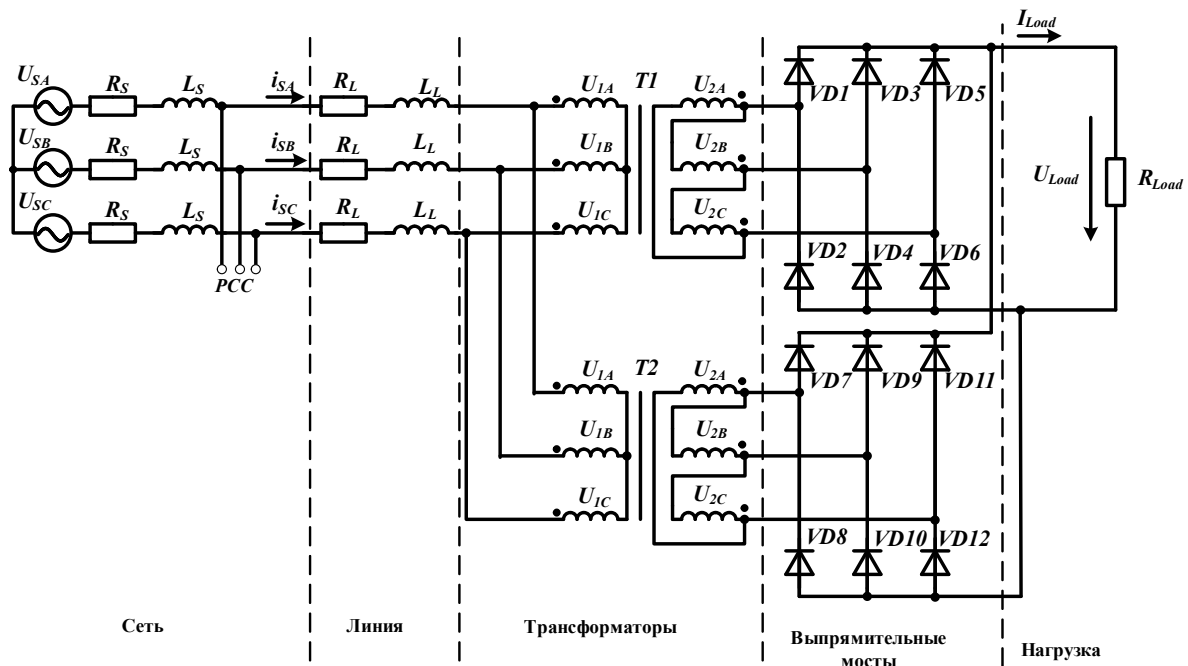
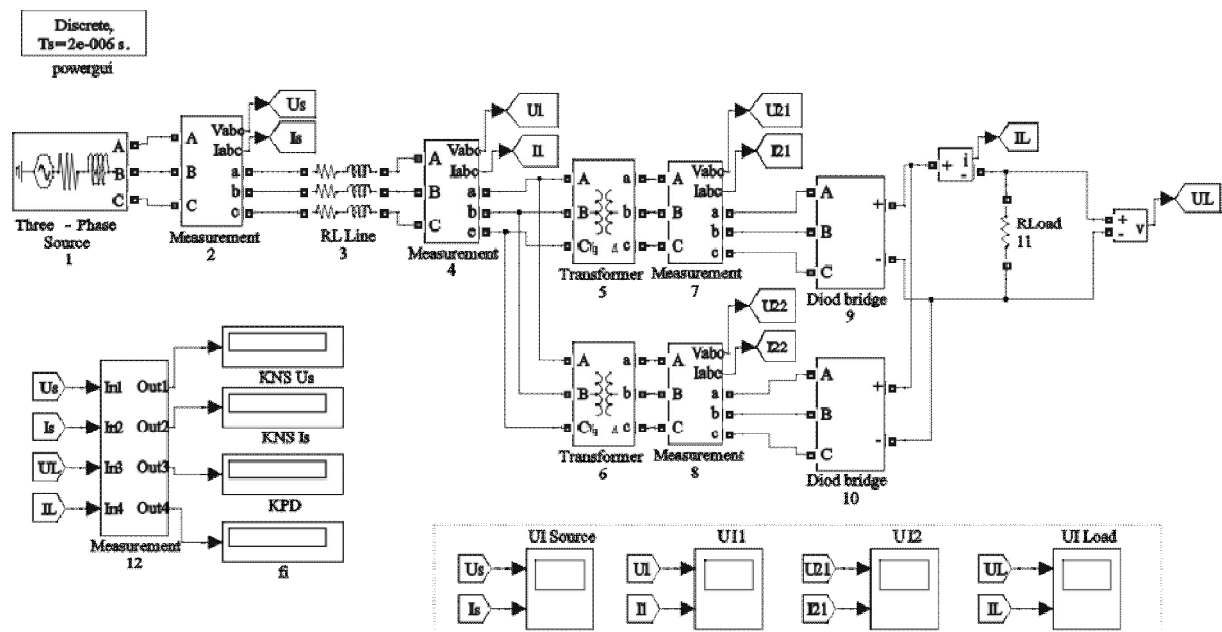


Рис. 1 – Эквивалентная схема традиционной СЭ контактной сети МП



13

Рис. 2 – MatLab-модель традиционной системы электроснабжения МП

Таблица 1 – Качественные показатели СЭ МП с различными типами полупроводниковых преобразователей

$\frac{I_{Load}^*}{I_{Loadnom}} = \frac{I_{Load}}{I_{Loadnom}}$	СЭ с НВ				СЭ с САФ				СЭ с АВ			
	$K_{HCl}$	$K_{HCU}$	$\varphi$	КПД	$K_{HCl}$	$K_{HCU}$	$\varphi$	КПД	$K_{HCl}$	$K_{HCU}$	$\varphi$	КПД
	%	%	эл.гр.		%	%	эл.гр.		%	%	эл.гр.	
1	20.6	1.3	21.2	0.953	0.6	0.2	3.7	0.985	0.89	0.93	0.28	0.956
0.9	23.7	0.86	15.2	0.967	1	0.3	1.34	0.995	2	1	0.2	0.965
0.8	24.8	0.64	12.5	0.968	0.75	0.08	0.8	0.998	3	1	0.2	0.972
0.7	25.4	0.52	10.9	0.967	0.97	0.08	0.6	0.998	4	1	0	0.974
0.6	25.8	0.44	9.8	0.964	1	0.07	0.2	0.998	5	1	0	0.974
0.5	26	0.38	9	0.96	1.3	0.06	0	0.998	5.8	1	0	0.973

Продолжение Таблицы 1

$I_{Load}^* = \frac{I_{Load}}{I_{Loadnom}}$	СЭ с НВ				СЭ с САФ				СЭ с АВ			
	$K_{HCl}$	$K_{HCU}$	$\varphi$	КПД	$K_{HCl}$	$K_{HCU}$	$\varphi$	КПД	$K_{HCl}$	$K_{HCU}$	$\varphi$	КПД
	%	%	эл.гр.		%	%	эл.гр.		%	%	эл.гр.	
0.4	26.1	0.34	8.3	0.956	1.2	0.06	0	0.995	7	1	0	0.971
0.3	26.2	0.31	7.8	0.953	1.4	0.06	0	0.985	7.8	1	0	0.97
0.2	26.2	0.28	7.4	0.948	1.5	0.06	0	0.986	8.9	1	0	0.968
0.1	26.2	0.26	7.1	0.944	1.8	0.06	0	0.98	9.9	1	0	0.965

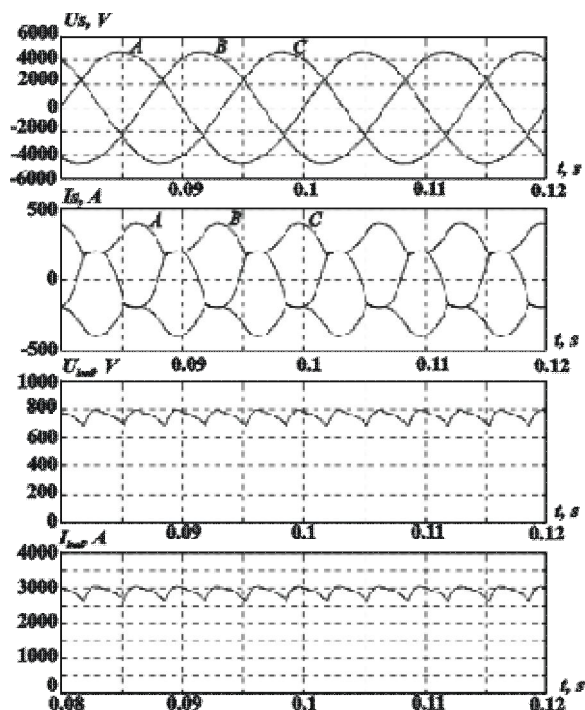


Рис. 3 – Осциллограммы фазных токов и напряжений сети, тока и напряжения нагрузки

### ТЯГОВАЯ ПОДСТАНЦИЯ МЕТРОПОЛИТЕНА С СИЛОВЫМ АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ

Одним из способов повышения КПД и улучшения электромагнитной совместимости (ЭМС) СЭ контактной сети МП с сетью является подключение параллельно СЭ силового активного фильтра на стороне 6 (10) kV. Применение САФ рационально лишь в том случае, если это не только обеспечит полную электромагнитную совместимость СЭ контактной сети с питающей сетью 6 (10) kV, но и уменьшит потери, соответственно, повысив КПД СЭ. На Рис. 4 приведена эквивалентная схема СЭ контактной сети МП с САФ.

Силовой активный фильтр устанавливается на тяговой подстанции. Он под-

ключается параллельно клеммам первичных обмоток трансформаторов. САФ подключается к СЭ контактной сети через реакторы  $L_R$ , от величины индуктивности которых, зависит частота переключения силовых ключей фильтра. Параллельно САФ подключаются фильтрующие конденсаторы  $C_F$ , которые не пропускают в сеть пульсации с частотой ШИМ.

На Рис. 5 приведена *MatLab*-модель СЭ контактной сети МП с САФ.

Модель состоит из девятнадцати блоков, из которых блоки 1 – 13 выполняют функции аналогичные тем, что и блоки *MatLab*-модели традиционной СЭ контактной сети приведенной на Рис. 2.

Назначение других блоков силовой схемы САФ:

15 – блок фильтрующих конденсаторов, которые подавляют высшие гармоники с частотой равной частоте переключения силовых ключей САФ;

16 – блок входных реакторов САФ, индуктивность которых определяет частоту переключения силовых ключей фильтра;

19 – блок силового активного фильтра, который состоит из шести IGBT-модулей, включенных по мостовой схеме, и двух конденсаторов на выходе моста.

Блок системы управления силовым активным фильтром 19 приведен на Рис. 6. Он осуществляет выработку управляющих импульсов транзисторов САФ. Все сигналы, циркулирующие в системе управления, представлены в относительных единицах. Система управления САФ выполнена на основе  $p-q-r$  теории мощности [7]. Для ее построения использовались преобразования координат обобщенных векторов напряжений и токов трехфазной СЭ [8].

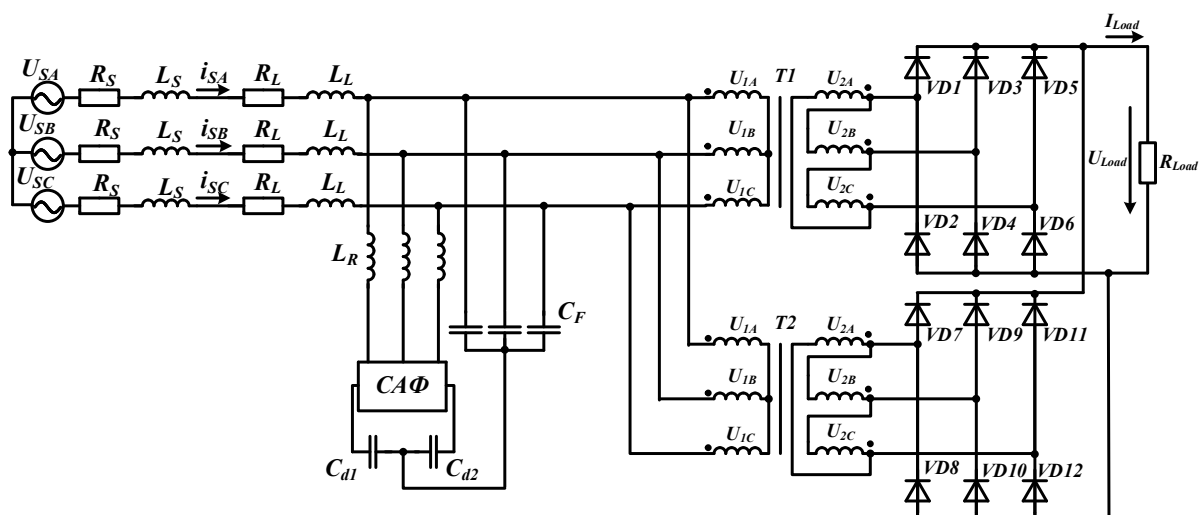


Рис. 4 – Эквивалентная схема СЭ контактной сети МП с САФ

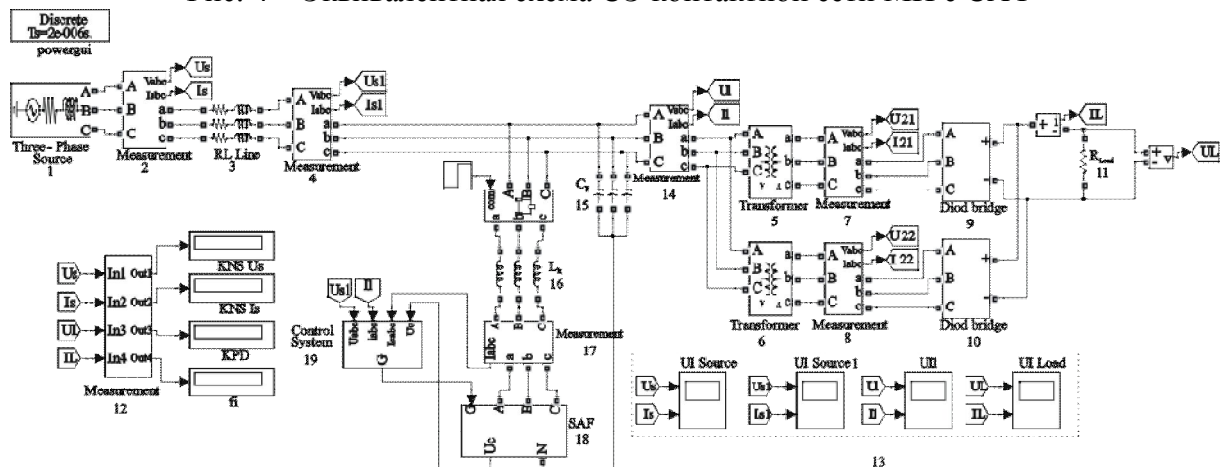


Рис. 5 – MatLab-модель СЭ контактной сети МП с САФ

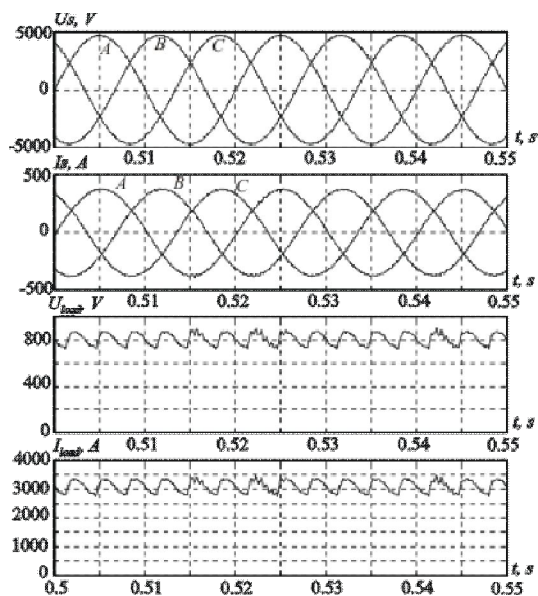


Рис. 7 – Осциллограммы фазных токов и напряжений сети, тока и напряжения нагрузки

Датчики тока и напряжения измеряют фазные токи и напряжения на входе понижающих трансформаторов (блок 14) и фазные токи на входе САФ (блок 17).

На Рис. 7 представлены кривые токов и напряжений сети и нагрузки в установившемся режиме. Номинальная мощность нагрузки 2,64 MW. Мощность короткого замыкания сети 53,3 MVA.

В Таблице 1 представлены показатели MatLab-модели СЭ контактной сети МП с САФ.

## ТЯГОВАЯ ПОДСТАНЦИЯ МЕТРОПОЛИТЕНА С АКТИВНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ

Улучшить электромагнитную совместимость СЭ контактной сети МП с питающей сетью 6 (10) kV возможно также

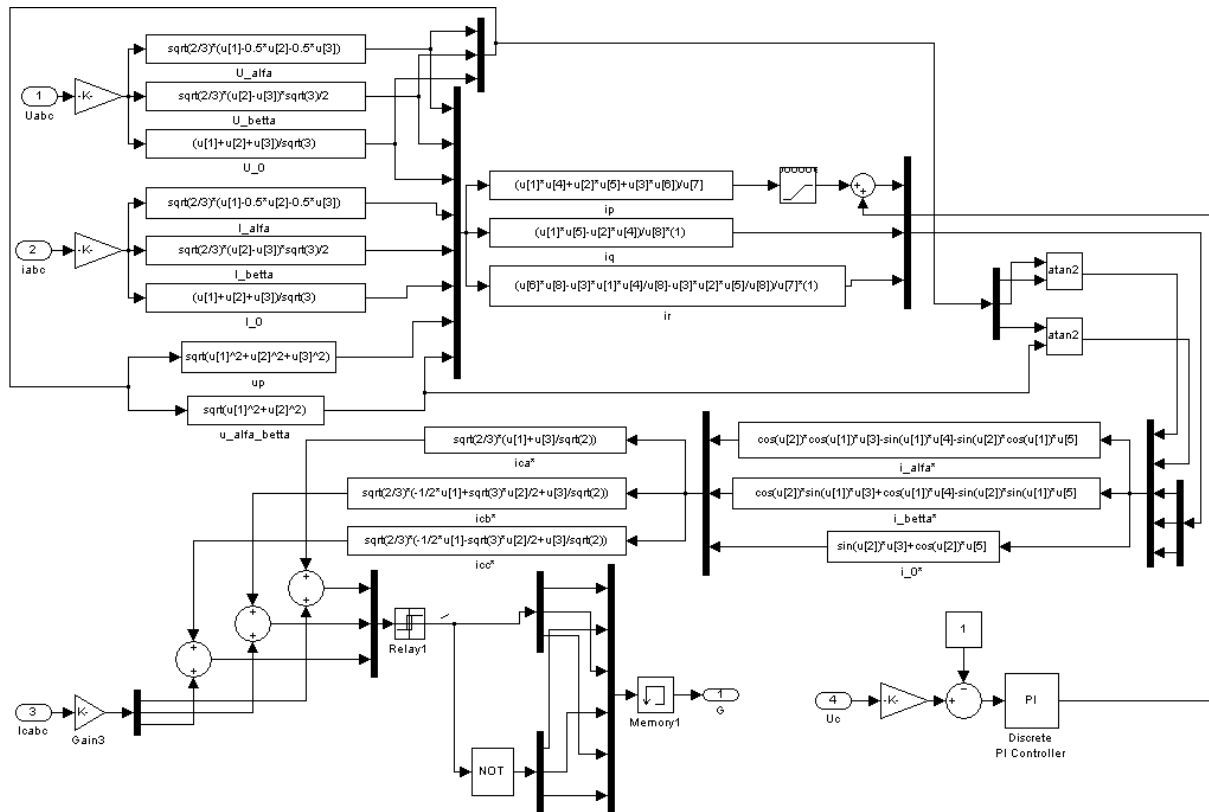


Рис. 6 – MatLab-модель системы управления САФ

путем замены неуправляемого выпрямителя активным выпрямителем. Использование активных выпрямителей открывает дополнительную возможность перехода от реостатного торможения к рекуперативному, при котором механическая энергия движущегося поезда возвращается в питающую сеть, что позволяет сократить потребление электроэнергии в 2 и более раза.

На Рис. 8 представлена эквивалентная схема СЭ контактной сети МП с АВ.

Сеть 6 (10) kV представлена трехфазной симметричной системой синусоидальных напряжений  $u_{SA}$ ,  $u_{SB}$ ,  $u_{SC}$ . Параметры сети учтены в каждой фазе активным сопротивлением  $R_S$  и индуктивностью  $L_S$ . Параметры линии, которая соединяет тяговую подстанцию 6 (10)/0.41 kV с подстанцией более высокого напряжения, учтены активным сопротивлением  $R_L$  и индуктивностью  $L_L$ . В отличие от традиционной СЭ, где напряжение на вторичных обмотках трансформаторов  $T1$  ( $T2$ ) составляет 0.67 kV, в СЭ с АВ необходимо

обеспечить следующее соотношение между напряжением на конденсаторе  $C_d$  и максимальным линейным напряжением на входе АВ [9]:

$$U_C = (1.3 \dots 1.5) U_{LMAX} \quad (4)$$

Первичная обмотка трансформатора  $T$  подключается к сети 6 (10) kV, а вторичная через реакторы  $L_R$  к активному выпрямителю, выполненному на IGBT-транзисторах  $VT1 - VT6$ , с выходным конденсатором  $C_d$ . Эквивалентная нагрузка представлена активным сопротивлением  $R_{Load}$ .

С целью повышения надежности схемы СЭ МП с АВ следует предусмотреть возможность работы схемы при выключенных транзисторах  $VT1 - VT6$  с питанием диодного моста  $VD1 - VD6$  от специальных клемм вторичной обмотки трансформатора с повышенным напряжением [3]. Возможный вариант реализации такого включения представлен на Рис. 9.

На Рис. 10 и 11 приведены соответственно MatLab-модель и



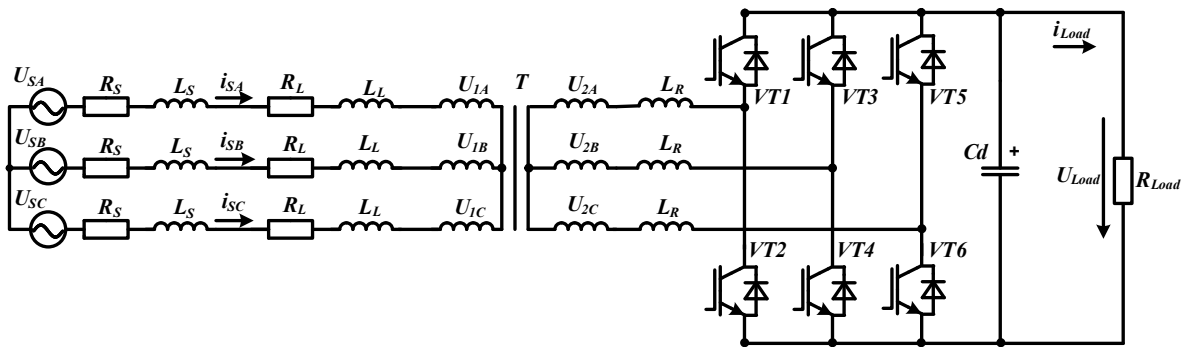


Рис. 8 – Эквивалентная схема СЭ контактной сети МП с АВ

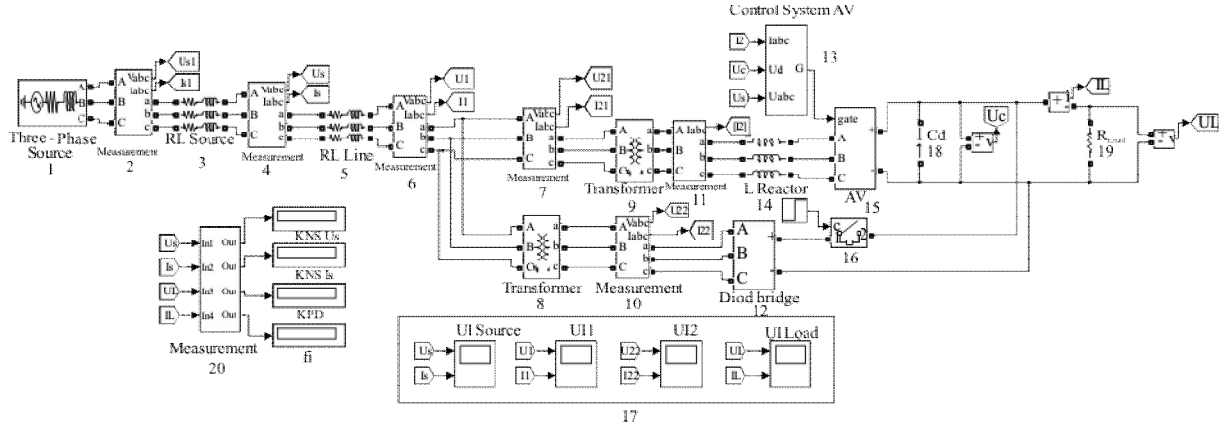


Рис. 10 – MatLab-модель СЭ контактной сети МП с АВ, работающем в режиме повышающего ШИП и в режиме НВ

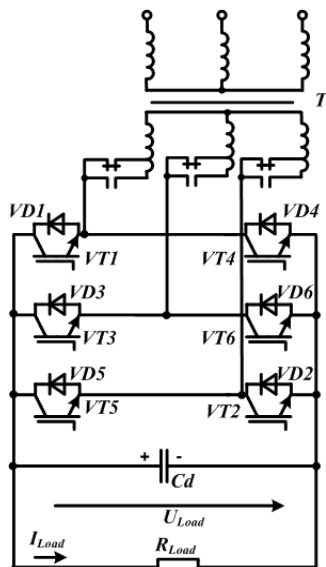


Рис. 9 – Схема подключения АВ к клеммам вторичной обмотки трансформатора

осциллограммы, иллюстрирующие работу СЭ МП с АВ, который работает в режимах повышающего широтно-импульсного преобразователя и НВ. Причем в режиме НВ АВ работает параллельно с дополнительным диодным мостом.

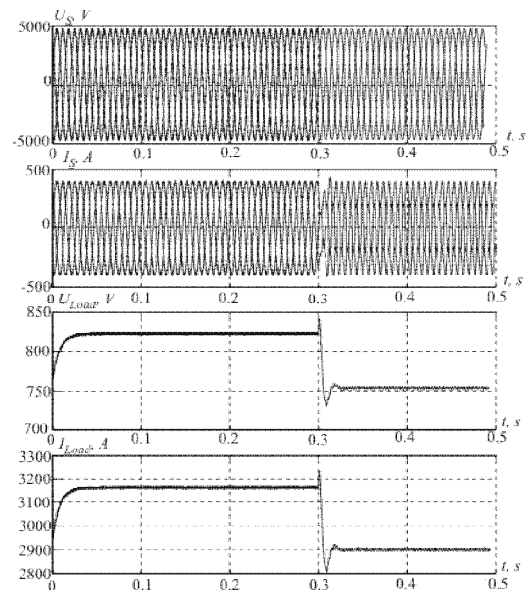


Рис. 11 – Осциллограммы фазных токов и напряжений сети, тока и напряжения нагрузки при переходе АВ с режима повышающего ШИП в режим НВ

На рис. 12 представлена MatLab-модель СЭ контактной сети МП с АВ.

Модель состоит из четырнадцати блоков, которые могут быть разбиты на следующие группы:





В блоке 13 выполняется расчет коэффициентов несинусоидальности сетевого тока и напряжения, угол сдвига фазного тока сети относительно фазного напряжения сети и коэффициент полезного действия СЭ контактной сети.

На Рис. 14 представлены кривые токов и напряжений сети и нагрузки в установившемся режиме. Номинальная мощность нагрузки 2,64 MW. Мощность короткого замыкания сети 53,3 MVA.

В Таблице 1 представлены показатели *MatLab*-модели СЭ контактной сети МП с АВ.

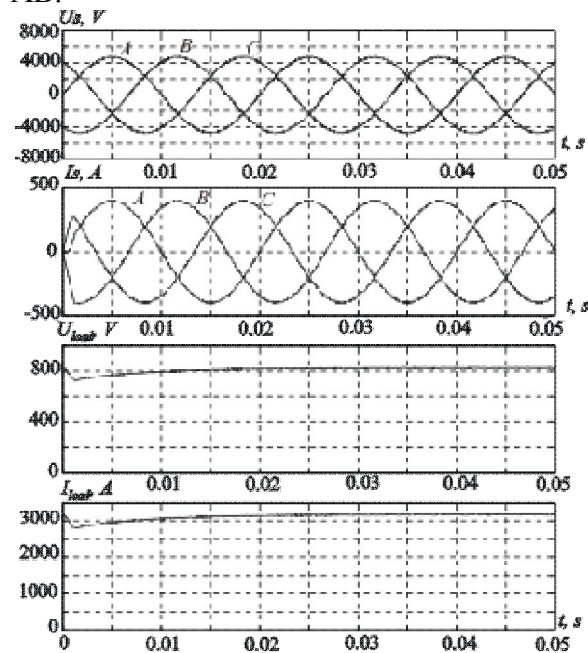


Рис. 14 – Осциллограммы фазных токов и напряжений сети, тока и напряжения нагрузки

## ВЫВОДЫ

1. Применение активных фильтров и активных выпрямителей в СЭ контактных сетей МП позволяет существенно улучшить их электромагнитную совместимость с питающей сетью и на 1–3 % уменьшить потери электроэнергии.

2. Использование активных выпрямителей открывает дополнительную возможность перехода от реостатного торможения к рекуперативному в поездах с тяговыми электроприводами постоянного

и переменного тока и полупроводниковыми преобразователями, при котором механическая энергия движущегося поезда возвращается в питающую сеть, что позволяет сократить потребление электроэнергии в 2 и более раза.

3. Дополнительное снижение потерь электроэнергии может быть достигнуто за счет использования накопителей энергии, устанавливаемых на поезде или тяговой подстанции.

[1] [www.metro.kharkov.ua](http://www.metro.kharkov.ua)

[2] Хворост М.В. «Розвиток наукових основ систем електричної тяги метрополітенів» – автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

[3] Жемеров Г.Г., О.И. Ковальчук Характеристики мощного шестипульсного мостового неуправляемого выпрямителя с емкостным фильтром. – Научно-практический журнал «Електротехніка і електромеханіка» – 2011. – №1. – С. 19-24.

[4] Jose R. Rodriguez, Juan W. Dixon, Jose R. Espinoza, Jorge Pontt, Pablo Lezan, “PWM Regenerative rectifiers: state of the art”, IEEE Transactions on Industrial electronics, vol. 52, no. 1, pp. 5-22, 2005.

[5] Jose Rodriguez, Jih-Sheng Lai, Fang Zheng Peng. Multilevel Inverters: A survey of topologies, controls and applications// IEEE transactions on industrial electronics, vol.49, no.4, august 2002.

[6] A. Bhattacharya, C. Chakraborty, and S. Bhattacharya, “Shunt compensation,” IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 3, no. 3, pp. 38-49, Sept. 2009.

[7] Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Ильина О.В., Тугай Д.В., «Уменьшение потерь и улучшение качества электроэнергии в системах коммунального электроснабжения». Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність» част. 2, сс. 80-87, 2008.

[8] Жемеров Г. Г., Колесник В. Ю., Ильина О. В. Соотношения для преобразования координат обобщенных векторов напряжений и токов трехфазной системы электроснабжения. Справочное пособие, НТУ «ХПИ», г. Харьков, 2009, 40 с.

[9] Жемеров Г.Г., Ковальчук О.И. Автономный выпрямитель – источник напряжения с гистерезисной системой управления. – Технічна електродинаміка: Тематичний випуск „Силовая електроніка та енергоефективність”, ч. 2, Київ – 2011. – С. 75 – 83.